

Introduction

Les câbles électriques sont les vecteurs des réseaux de transport d'énergie électrique ainsi que des réseaux de communication. Ces câbles sont assujettis à des contraintes de toutes sortes (court-circuit, circuit ouvert, défauts d'impédance, etc.). La mise en œuvre de systèmes de diagnostic des câbles est nécessaire.

L'objectif de ce chapitre est de présenter un aperçu sur les câbles électriques, de mettre l'accent sur les défauts rencontrés dans les câbles électriques et de présenter les méthodes de diagnostic permettant de détecter et de localiser les défauts.

Pour cela nous introduisons dans un premier temps, les différents types de câbles ainsi que leurs domaines d'application tels que la distribution de l'énergie électrique, le transport, les télécommunications, etc. Dans un deuxième temps nous présenterons les différents défauts dans les câbles. Selon leur sévérité, on peut distinguer deux types de défauts : le défaut franc et le défaut non franc. Nous allons finalement nous intéresser aux méthodes de diagnostic : les méthodes classiques et les méthodes basées sur la réflectométrie. Pour les méthodes de réflectométrie on trouve deux grandes familles telles que les méthodes dans le domaine temporel et celles dans le domaine fréquentiel. Enfin, les performances de la réflectométrie seront évoquées.

1.1. Présentation du câble électrique

Un câble électrique est défini comme un ensemble de conducteurs parallèles, blindés ou non, enveloppés dans une gaine commune. Selon le nombre de conducteurs, le type de blindage ainsi que la nature de l'information transmise, différents types de câbles ont été conçus.

1.1.1. Types de câbles

Le choix d'un câble dépend non seulement de la nature du signal à transmettre (analogique ou numérique, énergie ou puissance, basse ou haute fréquence, etc.) mais aussi du débit souhaité, de l'environnement, de la longueur du réseau et évidemment du domaine d'application. Dans ce contexte, on peut distinguer au moins quatre grandes familles de câbles comme : le câble coaxial, le câble bifilaire, la paire torsadée et la fibre optique.

1.1.1.1. Câble coaxial

Conçut en 1930 par l'américain Herman Affel, il est constitué d'une âme centrale composée d'un seul brin en cuivre ou de plusieurs brins torsadés, permettant la circulation de l'information. Cette âme est ensuite entourée d'un isolant constitué d'un matériau diélectrique afin d'éviter tout contact avec le blindage métallique tressé. Ce dernier permet non seulement de protéger les données contre les parasites tels que le bruit et les interférences extérieures mais aussi d'assurer la transmission à haut débit et sur de longues distances. Enfin, on trouve la gaine qui est un isolant externe et qui protège le câble de son environnement extérieur comme décrit dans **(Figure I.1)** [7]. Le câble coaxial s'étend, généralement, à toute application où le signal peut subir le minimum d'affaiblissement et de distorsion telle que les télécommunications, l'informatique, l'aérospatiale, le militaire, etc.

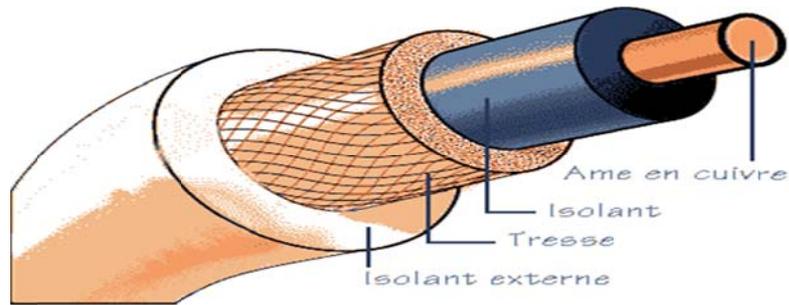


Figure I.1 - câble coaxial.

1.1.1.2. Câble bifilaire

Nous trouverons aussi des câbles composés de deux conducteurs parallèles séparés par un diélectrique. Les pertes dans ce type de câble sont importantes. Ces câbles possèdent une grande sensibilité au bruit. Ils sont surtout utilisés pour l'alimentation des d'antennes à impédance élevée au point d'alimentation.



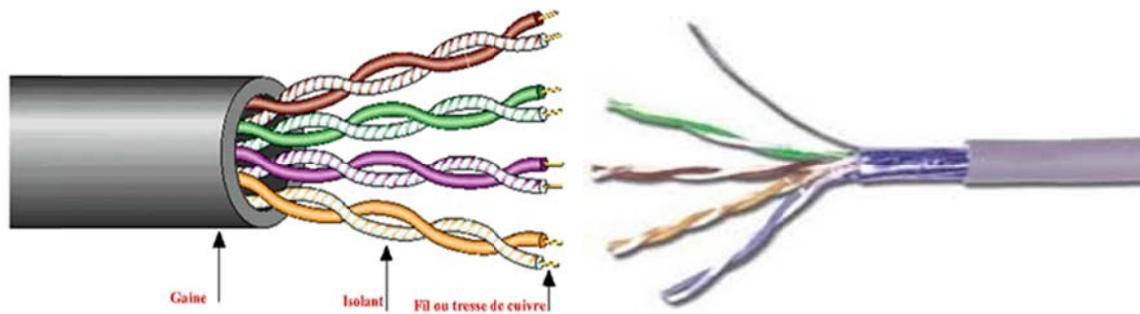
Figure I.2 - câble bifilaire [2].

1.1.1.3. Paire torsadée

Ce type de câble est constitué d'au moins deux conducteurs enroulés en hélice l'un autour de l'autre (**Figure I.3**). Cette configuration a pour but précisément de maintenir la distance entre les fils et de réduire la diaphonie. Plus le nombre de torsades est important, plus la diaphonie est réduite. Il est aussi important de maintenir la distance entre les conducteurs pour obtenir une impédance caractéristique homogène. Les paires torsadées sont souvent

blindées afin de limiter les interférences. Elles peuvent conduire des signaux parfois supérieurs à 1 GHz. Ces câbles sont moins sensibles au bruit. Ils sont très utilisés pour le câblage téléphonique et informatique au niveau local [2]. On distingue plusieurs catégories de paires torsadées selon le blindage : paire torsadée non blindée, paire torsadée écrantée, paire torsadée blindée.

- Une paire torsadée non blindée (en anglais Unshielded Twisted Pair UTP) n'est pas protégée par un blindage. C'est elle qui est surtout utilisée dans les installations téléphoniques et les réseaux informatiques domestiques.
- Les paires torsadées peuvent être entourées par une gaine commune de blindage. On parlera de pair torsadée écrantée (en anglais Foiled Twisted Pair ou FTP).
- Dans une paire torsadée blindée (en anglais Shielded Twisted Pair ou STP), chaque paire torsadée est entourée d'un blindage pour une meilleure immunité contre les perturbations électromagnétiques. La figure 11 montre la description matérielle de différents types de paires torsadées [7].



Paires torsadées blindées



Figure I.3 - Types de paires torsadées.

1.1.1.4. Fibre optique ou guide d'onde

Une fibre optique est un mince filament cylindrique en verre (silice) qui permet de guider une onde électromagnétique en le confinant entre deux couches d'indices de réfraction différents. Elle est très utilisée en télécommunications car elle permet des transmissions sur de longues distances et sur une large bande de fréquences.

Les fibres optiques comportent un cœur de diamètre allant de 10 à 50 μ m et une gaine de diamètre extérieur de l'ordre de 125 μ m avec un indice de réfraction plus faible que celui du cœur.

La lumière se propage dans le cœur tout au long de la fibre par réflexions totales successives aux interfaces cœur/gaine. Un schéma de la structure d'une fibre optique est représenté dans (**Figure I.4**) [9].

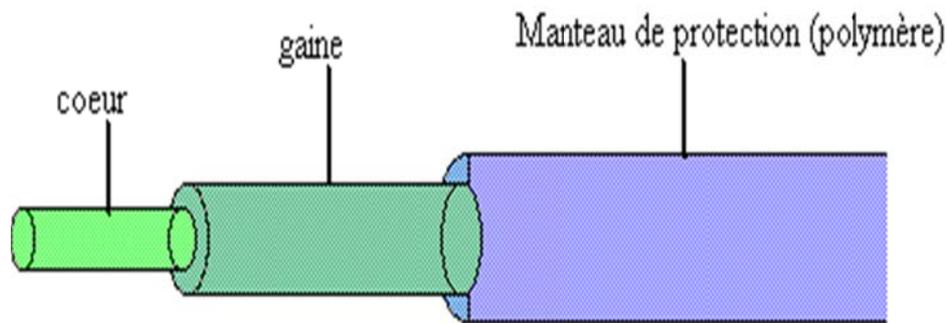


Figure I.4 - Fibre optique.

Le choix d'un modèle de câble dépend d'un certain nombre de contraintes (environnementales, économiques et comportementales) et surtout de l'application. Chacun de ces câbles est adapté à un domaine d'application particulier.

1.1.2. Domaines d'application des câbles électriques

La présence d'un support physique bien délimité pour le transport de l'énergie électrique et de l'information demeure inévitable. Par ailleurs l'étendue des câbles a considérablement augmenté pour répondre aux exigences des nouvelles technologies (débit, taux d'erreur, temps réel, etc.). Les câbles électriques sont principalement utilisés dans les domaines tels que : la distribution d'énergie, l'aéronautique, l'automobile et les télécommunications.

Dans le domaine de la **distribution d'énergie**, les câbles sont utilisés dans les lignes de transport aérien et souterrain. Les lignes aériennes sont de plus en plus remplacées par les câbles souterrains. Les câbles sont déroulés par

tronçon de 600m (pour le 225KV) à 800m (pour le 63kv et 90KV) et sont raccordés entre eux par des jonctions installées dans des câbles de jonctions souterraines [7].

Dans le domaine de l'**aéronautique**, la fiabilité des câbles est plus que d'actualité avec l'essor des avions électriques.

Tout récemment la société européenne Airbus qui, depuis de nombreuses années travaille sur un programme de recherche et de développement d'avions électriques, a procédé à des essais de l'E-fan, un avion muni de deux moteurs alimentés par des batteries placées au niveau des ailes. L'autonomie de cet avion dépend non seulement de la batterie mais aussi de la fiabilité des câbles électriques qui relient ces batteries aux moteurs.

De plus dans l'aéronautique, l'intérêt de passer de systèmes pneumatique, hydraulique et mécanique à de systèmes électriques s'est avéré. L'avantage est double : d'une part, les systèmes électriques sont moins complexes, moins coûteux et plus fiables que les systèmes hydrauliques et mécaniques. D'autre part, les systèmes électriques permettent de baisser la masse d'un avion donc la consommation en carburant [7].

Dans l'**automobile**, en dehors mêmes des voitures électriques, les câbles électriques (utilisés en électronique embarquée) sont de plus en plus utilisés pour de plus en plus de fonctionnalités et de confort. Ce besoin en électronique embarquée dans l'automobile a évolué d'une façon considérable au cours de ces dernières années passant de 2% à 30% du coût de production d'une voiture entre 1920 et 2000. Cette proportion pourrait atteindre 35%, voire 40%, en 2015 [7].

Dans les **télécommunications**, de grandes longueurs de câbles sont aussi rencontrées, suite à l'explosion du nombre d'abonnés, ainsi que des services fournis par les opérateurs de télécommunications (services mobiles, télévision numérique, radiodiffusion, vidéocommunication, transmission des données, etc.). Mais aussi dans les liaisons internationales telles que les câbles sous-marins.

1.2. Défauts dans les câbles

En fonction de la sévérité de leur environnement, des conditions d'utilisation, les câbles électriques peuvent être soumis à des défauts.

1.2.1. Typologies des défauts dans les câbles

Les défauts diffèrent par leur sévérité. Il existe des défauts francs et des défauts non francs.

1.2.1.1. Défauts francs

Les défauts francs sont des défauts sévères. Ils peuvent entraîner des pannes des systèmes électriques. Nous citons par exemple les courts circuits et les circuits ouverts [1].



Figure I.5 - Exemple d'un défaut franc : circuit ouvert [3].

Pendant plusieurs années les types de défauts de câblage se sont concentrés sur les circuits ouverts (ou rupture) et les court-circuits. Ces défauts francs affectent profondément les performances du système. Mais d'autres défauts intermittents ou non francs sont également importants.

1.2.1.2. Défauts non francs

Les défauts non francs modifient modérément les caractéristiques internes des câbles mais peuvent évoluer vers des défauts francs. Nous citons par exemple les défauts d'éraflure des câbles et les défauts qui sont dus au vieillissement des câbles.



Figure I.6 - Exemple d'un défaut non franc : dénudation d'un câble [3].

Ces défauts sont les conséquences de plusieurs facteurs externes ou internes.

1.2.2. Classification des défauts

Les défauts électriques peuvent aussi être classifiés selon leurs causes. Nous avons les causes internes et les causes externes.

1.2.2.1. Causes externes

Les défauts peuvent être causés par :

- Soit une **agression mécanique** externe : coup de pioche ou de pelleuse (dans ce cas facilement décelables), accrochage par une ancre ou un chalut dans le cas des câbles sous-marins.
- Soit une **pénétration d'eau** au niveau du complexe externe (entre gaine de protection et écran) suite à une détérioration au cours du tirage ou à de trop fortes contraintes thermomécaniques locales pendant le fonctionnement du câble.
- Soit une **erreur de montage ou d'installation** d'un accessoire (jonction, dérivation ou extrémité).
- Soit une **application incorrecte** due au choix du câble qui n'est pas adapté à l'usage qui lui est fait.

1.2.2.2. Causes internes

Les défauts peuvent aussi être causés par :

- Soit une **erreur de fabrication** qui n'a pas été décelée lors des essais de réception en usine (présence de vacuoles, impuretés créant des décharges partielles conduisant à la dégradation progressive de l'enveloppe isolante). On peut néanmoins considérer que ce type de défaut est peu fréquent dans la mesure où les câbles, d'une part, subissent des essais de qualification poussés qui mettraient en évidence de tels risques de défauts, d'autre part, font l'objet d'essais de purge et de réception à de très hauts niveaux de tension avec leur livraison.
- Soit un **échauffement local** important dans le cas d'un terrain de très forte résistivité thermique.

- Soit un **vieillissement** à long terme du diélectrique (c'est le cas des câbles à isolation au papier imprégné ci-après) [4].

Tous ces facteurs provoquent des modifications sur les paramètres intrinsèques du câble et se traduisent par l'apparition de défauts. Une étude américaine a montré qu'il existe un lien très étroit entre le nombre de problèmes liés aux câbles et l'âge des avions (civils ou militaires).

Tableau I.1 - Probabilité d'apparition de défauts dans un câble en fonction de l'âge dans l'industrie aéronautique [3].

Age (Années)	Probabilité (%)
5	35
10	52
20	66

1.2.3. Vieillissement des câbles

La notion de vieillissement décrit une ou plusieurs modifications fonctionnelles diminuant progressivement l'aptitude d'un objet, d'une information ou d'un organisme à assurer ses fonctions. L'élément du câble le plus sensible au vieillissement est son isolant. En effet, sous l'action de nombreux facteurs (champ électrique, température, humidité, radiations,...) les propriétés de ces isolants se dégradent dans le temps de manière réversible ou irréversible. Ce phénomène présente des effets défavorables pour le matériel électrique pouvant se manifester par l'apparition de défaillances associées à des phénomènes de rupture et de décharges électriques des isolants et ceci, sous des contraintes bien plus faibles que celles prises en compte à la conception.

Le vieillissement de câbles est aussi défini comme la dégradation des performances due à l'accumulation de défauts à long terme provoqués par des contraintes chimique, thermique, électrique et mécanique. Ces contraintes sont liées à l'environnement, l'installation et la maintenance [6].

1.2.3.1. Types de vieillissement

Il existe différents mécanismes de vieillissement qui peuvent être classés en deux familles : le vieillissement physique et chimique. Par exemple, pour la première famille, l'utilisation d'une contrainte mécanique et d'un liquide tensioactif (**Figure 1.7**) peut provoquer à terme une déformation ou une fissuration.

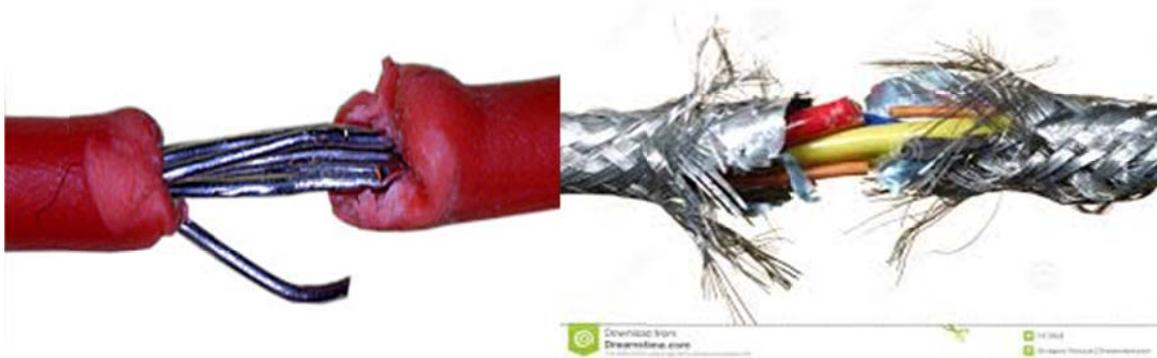


Figure 1.7 - Exemples de câbles fissurés.

Pour la deuxième famille, les mécanismes à l'origine du vieillissement sont plus variés; comme la chaleur (dégradation thermique) qui abîme souvent l'isolant ou la corrosion (**Figure 1.7**), qui va souvent se produire à l'intérieur sans dégâts visibles sur la surface extérieure de l'âme du câble. La corrosion est le facteur de vieillissement le plus délicat dans les câbles parce qu'elle touche l'âme du câble et empêche les composantes du câble de bouger de façon souple lorsque ce dernier se courbe. Ce phénomène peut interrompre ou dégrader les signaux

envoyés d'un dispositif électronique à un autre. Une fois que cette interruption se produit, le dispositif électronique peut seulement fonctionner par intermittence.

Le vieillissement peut être modélisé par une légère modification des paramètres électriques (*RLCG*) que nous allons voir dans la modélisation des lignes de transmission (**Chapitre II**).

1.2.3.2. Effets des vieillissements sur les câbles

Les exemples que nous allons présenter dans ce paragraphe soulignent l'importance de la connaissance de l'état du câble afin d'anticiper le changement des câbles susceptibles de ne plus fonctionner normalement ou de passer sur un câble de secours déjà en place (redondance).

Premièrement, prenons l'exemple de la Marine Américaine (US Navy) qui est souvent préoccupée par un problème majeur qui est le vieillissement des câbles sur ses avions. Après des études, ils ont constaté que l'isolant polyamide aromatique utilisé sur le câblage se détériore plus vite que prévu. La détérioration prématurée du câblage dans les avions de la marine est due à l'infiltration de l'humidité et à l'environnement agressif en haute altitude. Cette dégradation des isolants du câblage des avions de la marine peut produire des arcs dans le faisceau de câblage, provoquant d'importantes pannes électriques qui ont des conséquences dangereuses pendant le vol.

Des mesures expérimentales du vieillissement d'un câble sur un échantillon d'avions (courbe de mortalité) sont présentées dans (**Figure I.8**).

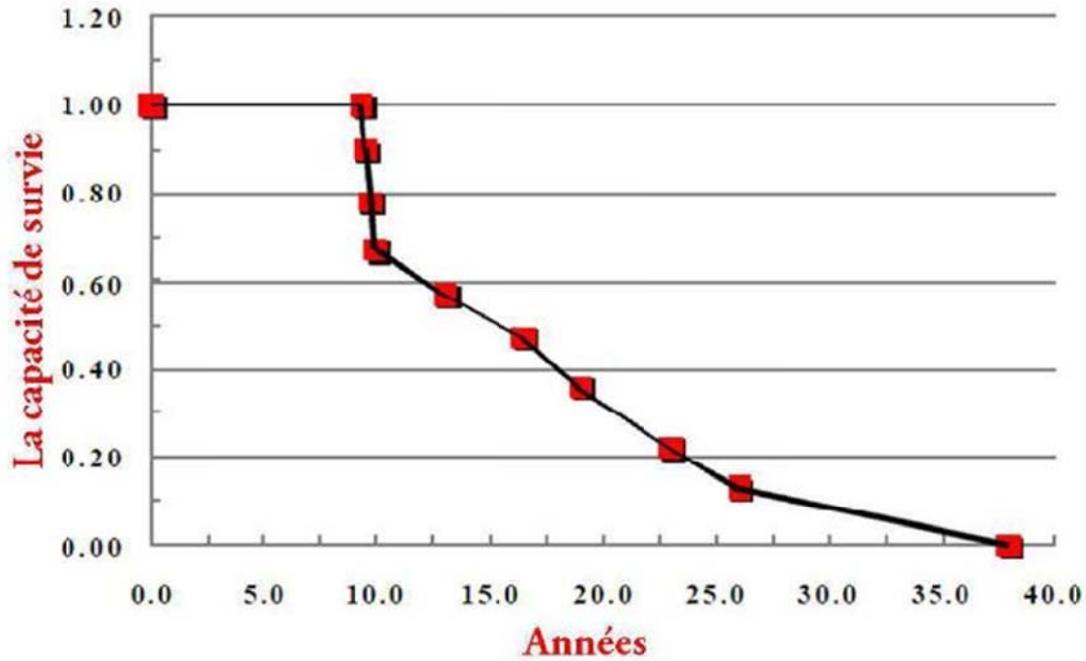


Figure I.8 - Capacité de survie d'un câble en fonction du temps [2].

D'après cette courbe, la capacité de survie d'un câble est réduite de moitié au bout d'une quinzaine d'années. Cette courbe de mortalité peut être utilisée pour anticiper efficacement la présence d'une anomalie dans le système de réseau d'interconnexions électriques.

Un autre exemple est celui des câbles situés dans les centrales nucléaires. Ces câbles sont soumis à des rayonnements ionisants qui agressent aussi bien les isolants que le métal, et qui entraînent à la longue une dégradation des qualités de transmission de signaux et une moindre résistance à un accident. Ainsi, ce genre de câble, bien qu'il soit soumis au rayonnement, doit pouvoir résister à des conditions accidentelles (telles qu'une irradiation massive sur un temps très court) afin de continuer à assurer sa fonction.

Finalement, prenons l'exemple du câble à isolation réticulée (XLPE). Il est employé principalement pour une utilisation souterraine.

Ce type de câble peut être posé dans des puits, tunnels et mines et ils sont soumis à des contraintes environnementales très sévères (humidité, chaleur, etc.).

Au cours du temps, l'isolant agencé autour du conducteur du câble vieillit et se dégrade. La destruction partielle ou complète de cet isolant implique un effort de maintenance du câble ou pire encore, son remplacement.

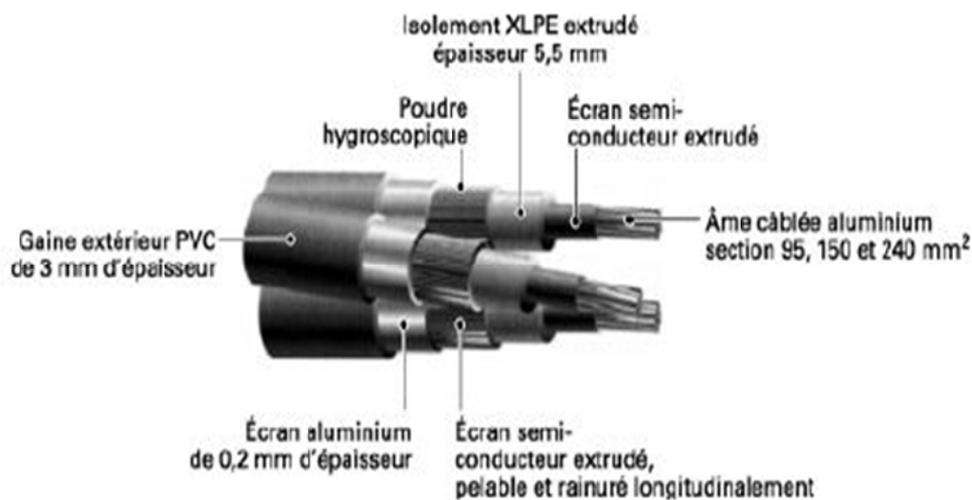


Figure I.9 - Structure du câble à isolation réticulée.

Pour mieux comprendre les effets du vieillissement sur les câbles électriques, des essais accélérés de vieillissement thermique continu ont été effectués sur un échantillon de câbles XLPE Union Carbide 4201 à quatre températures de vieillissement différentes variant de 80°C à 140°C pendant 5000 heures. Toutes les 500 heures, le facteur de pertes diélectriques et la permittivité relative sont mesurés. Dans **Figure I.10 (a)**, le facteur de pertes diélectriques présente des faibles variations en fonction du temps de vieillissement dans les températures entre 80°C et 100°C. Par contre aux températures de 120°C et 140°C, le facteur de pertes diélectriques augmente rapidement et atteint des valeurs élevées après un court temps de vieillissement. Dans **Figure I.10 (b)**, la permittivité

relative ne change pratiquement pas avec le temps de vieillissement à des températures de 80°C et 100°C. Toutefois, pour les autres températures : 120°C et 140°C, nous remarquons une brusque augmentation après 1500 heures (pour 140°C) et 2000 heures (pour 120°C). Les résultats obtenus ont révélé que le vieillissement thermique affecte considérablement les propriétés du matériau et rend l'isolant très fragile [8].

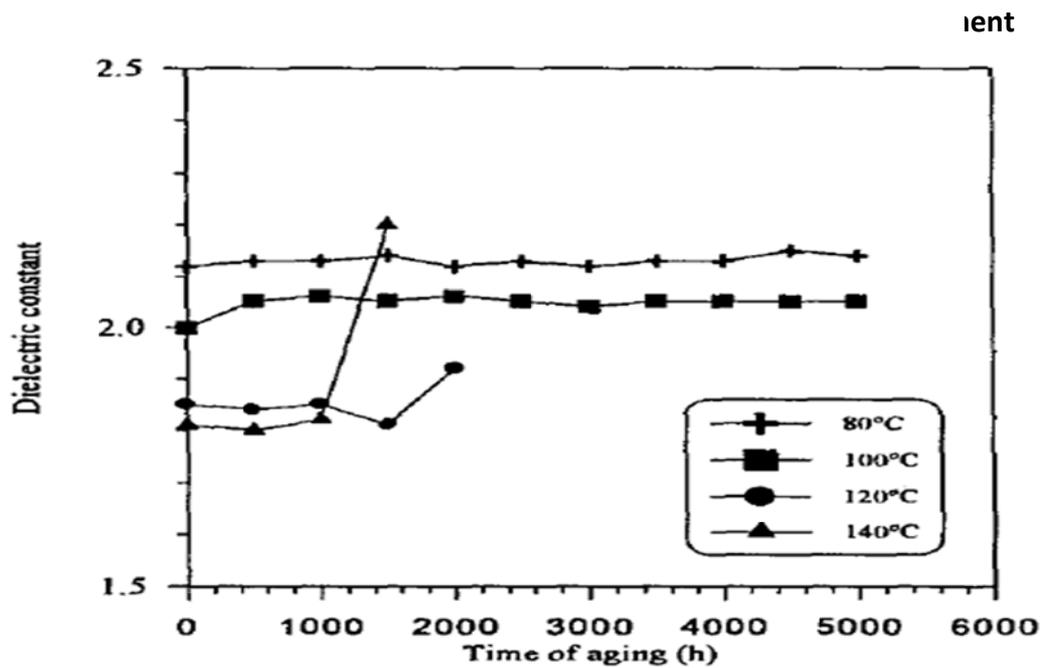
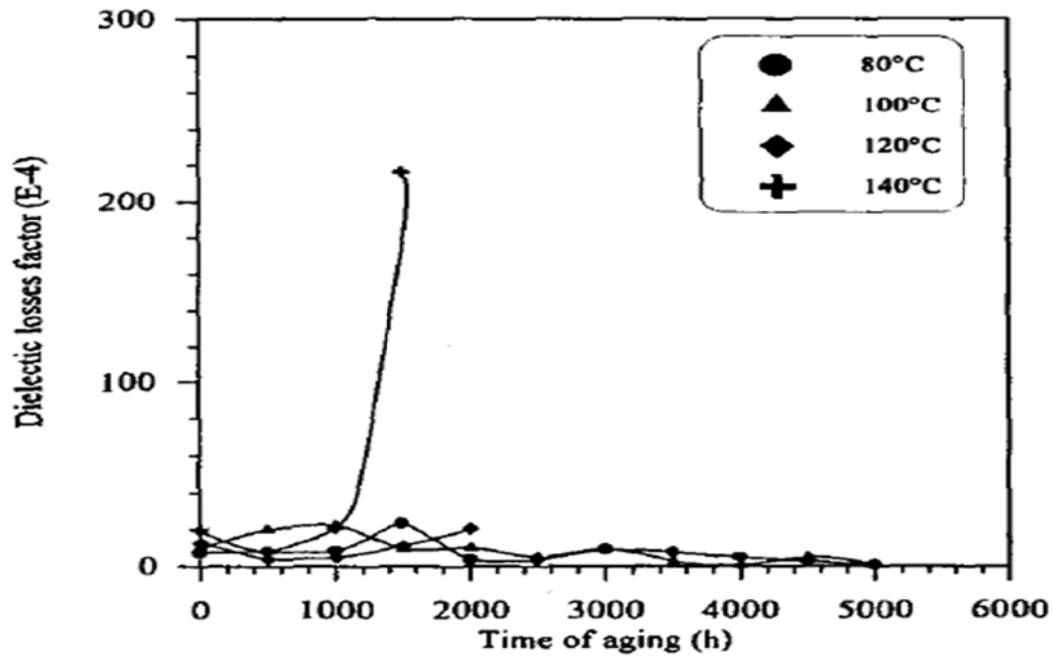


Figure I.10 - Variation du facteur de pertes diélectriques (a) et de la permittivité relative (b) en fonction du vieillissement thermique [8].

Ces deux courbes montrent la variation du facteur de pertes diélectriques (a) et de la permittivité relative (b) en fonction du vieillissement thermique à des valeurs de températures différentes allant de 80°C à 140°C: (a) aux températures de 120°C et 140°C, le facteur de pertes diélectriques augmente rapidement et atteint des valeurs élevées après un court temps de vieillissement. Dans (b), nous remarquons une brusque augmentation de la permittivité relative après 1500 heures (pour 140°C) et 2000 heures (pour 120°C).

1.2.3.3. Conséquences des défauts non remédiés dans les câbles

Les défauts de câbles se traduisent par une rupture de câble, des défauts d'isolation qui peuvent perturber les signaux électriques ou provoquer des arcs électriques.

Des archives de maintenance des avions de chasse montrent que le défaut d'isolation est le plus fréquent des défauts de câble. Ceci est présenté dans

Tableau I.2.

Tableau I.2 - Exemple de problèmes de câble dans la maintenance des avions [6].

Description du défaut	Pourcentage des problèmes (%)
Usure/défaut d'isolation	46
Câble fissuré	14
Circuit ouvert	4
Court-circuit	7
Disparition de câble	4
Pas de défaut trouvé	25

L'apparition d'un défaut électrique dépend de la sensibilité du câble et de l'environnement dans lequel il baigne.

1.3. Détection et localisation des défauts dans les câbles

Il faut noter que les câbles ont une durée de vie limitée et doivent faire l'objet d'un diagnostic régulier ayant pour principale mission de vérifier leur état de fonctionnement et la qualité de leur isolation. Tôt ou tard se posera la question d'un remplacement ou du moins de leur maintenance.

1.3.1. But et importance de la détection et de la localisation des défauts

Il s'agit de détecter, localiser et caractériser des défauts électriques tels que un court-circuit, un circuit ouvert, une rupture de brins, une usure localisée de l'isolant, un blindage détérioré, un vieillissement de câble, etc. Ces anomalies peuvent être à l'origine de dysfonctionnements ou de conséquences plus graves pour le système et son environnement (en particulier dans des domaines tels que l'avionique, l'automobile, les systèmes de sécurité...).

Le diagnostic filaire nous permet de tirer des avantages tels que : la sécurité des personnes, la réduction des risques de dégâts matériels, le Gain de temps, le profit économique et la diminution de l'impact environnemental.

1.3.2. Stratégies de diagnostic

La stratégie de diagnostic consiste à étudier le nombre, l'emplacement des systèmes de diagnostic, leur interaction avec le réseau en général et avec certains équipements du réseau, la période ou la fréquence de contrôle, les contraintes d'application et les objectifs visés dans ce diagnostic.

1.3.2.1. Diagnostic en ligne

Le diagnostic de défauts en ligne consiste à détecter et à localiser des défauts électriques permanents ou intermittents sur le réseau d'un système alors que celui-ci est en fonctionnement. Néanmoins cette détection concurrente entraîne divers phénomènes d'interférence entre le système de diagnostic et le système cible ainsi que des contraintes de robustesse au bruit, au niveau de la mesure [5].

1.3.2.2. Diagnostic externe

Confronté à un dysfonctionnement du câble, l'opérateur de maintenance peut brancher le système de dépannage au réseau câblé pour localiser le défaut : cela est un diagnostic externe [6].

L'enjeu majeur d'un diagnostic externe est de fournir à l'opérateur de maintenance une information exploitable. Ceci n'est pas toujours garanti puisque la complexité d'un réflectogramme dépend non seulement de la topologie du réseau mais aussi des caractéristiques du défaut potentiel.

En effet, si on a un écho du signal de test à chaque interconnexion avec ses différents allers retours dans le réseau, on peut imaginer la complexité des signaux mesurés ainsi que la difficulté de l'analyse du réflectogramme correspondant dans le cas d'un réseau complexe. En outre, la présence d'un ou plusieurs défauts sur le réseau accentue la complexité des signaux mesurés. Ceci peut entraîner une mauvaise interprétation du réflectogramme par l'opérateur de maintenance et affecter ainsi la qualité du diagnostic [7].

1.3.2.3. Diagnostic embarqué

Lorsque les câbles font partie d'un système critique, certains défauts peuvent avoir des conséquences dramatiques (alimentation électrique

interrompue, charge utile immobilisée, perte de communication entre des systèmes vitales ou interdépendants, etc.). Ces systèmes critiques peuvent donc nécessiter le diagnostic embarqué pour un contrôle et une décision en temps réel. Cela implique le respect de contraintes supplémentaires telles que la taille et le coût.

L'architecture du système de diagnostic embarqué doit prendre en compte l'ensemble de la chaîne de mesure jusqu'à la localisation du défaut. Elle compte trois fonctions principales : un module de génération du signal de test, un module d'acquisition du signal mesuré et un module de traitement [7].

1.3.2.4. Diagnostic distribué

Il y'a aussi, ce qu'on appelle le diagnostic distribué qui consiste à placer des systèmes de diagnostic en plusieurs points du réseau afin d'augmenter les performances du système de diagnostic [12].

1.4. Méthodes de détection et de localisation des défauts dans les câbles

1.4.1. Méthodes classiques

Bien que dans ce mémoire, ce qui nous intéresse ce sont les méthodes de détection des défauts, basées sur l'utilisation de la propagation d'ondes électromagnétiques guidées, il existe d'autres moyens de procéder à ce type de tâche.

1.4.1.1. Inspection visuelle

C'est la méthode la plus intuitive pour l'opérateur à qui l'on confie un réseau de câbles. Elle consiste à inspecter l'ensemble avec le moyen le plus simple dont il dispose : sa propre expertise. Cela peut constituer une bonne solution de prime abord, bien qu'elle soit soumise à la subjectivité de celui qui la pratique. De plus, la plupart des câbles ne sont pas directement accessibles mais sont cachés derrière des garnitures. Avec l'augmentation de la complexité des fonctions électriques, les longueurs mises en jeu deviennent trop importantes pour que l'opération puisse être achevée en un temps raisonnable. C'est pourquoi d'autres méthodes deviennent nécessaires [2].

1.4.1.2. Méthode par rayon X

La méthode par rayon X permet au technicien de connaître non seulement l'état de la face extérieure du câble mais également l'état de l'isolant et des conducteurs situés à l'intérieur. L'inconvénient de cette méthode est que le générateur de rayon X et le détecteur sont des instruments lourds. Ils doivent être positionnés près du câble et être associés à une intervention humaine pour l'analyse des données récoltées. Cette technique n'est applicable que pour les câbles dont l'accès est facile [2].

1.4.1.3. Spectroscopie d'impédance

La spectroscopie d'impédance est une méthode haute fréquence qui permet de connaître l'état d'un câble électrique en analysant les caractéristiques de son isolant dans une gamme de fréquence donnée. Une onde sinusoïdale est injectée via un analyseur de réseau à l'extrémité du câble à tester. Le câble doit être isolé de tout autre système en le déconnectant afin de ne pas fausser la mesure. Le principe de cette méthode est de mesurer l'impédance du câble en faisant varier la fréquence de l'onde injectée. Les données enregistrées sont comparées à celles préalablement mesurées sur un

câble sain identique à celui sous test. La procédure de mesure fait que cette méthode ne peut être utilisable pour une application embarquée (base de données, accès aux extrémités du câble, débranchement du câble, etc.). Cette méthode n'est encore qu'au stade expérimental et n'a pas à ce jour été utilisée pour le diagnostic de réseau de câbles [3].

1.4.1.4. Méthode capacitive inductive

La méthode est basée sur la mesure de la capacité ou de l'inductance du câble. La mesure de la capacité est utilisée pour localiser un circuit ouvert et la mesure de l'inductance pour localiser un court-circuit sur le câble. La valeur de l'inductance ou de la capacité linéique dans un câble dépend de la distance « D » entre deux conducteurs, du diamètre « d » des conducteurs, de la permittivité ϵ , du diélectrique séparant les deux conducteurs et de la perméabilité magnétique de l'isolant μ . Si nous considérons une ligne bifilaire symétrique (**Figure I.11**), la capacité et l'inductance linéiques sont données par les relations suivantes :

$$C = \frac{\pi\epsilon}{\cosh^{-1}\left(\frac{D}{d}\right)} \quad L = \frac{\mu}{\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{D}{d}\right) \quad (1.1)$$

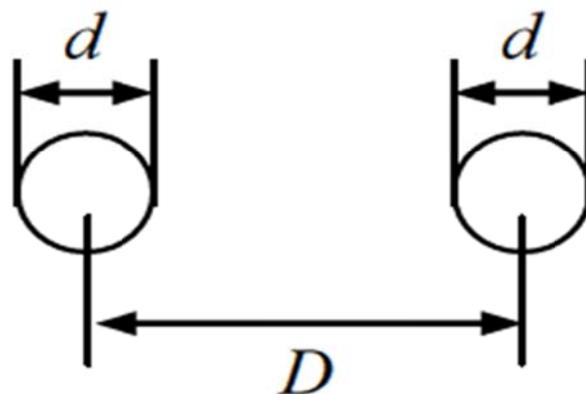


Figure I.11 - Paramètres linéiques C et L pour une ligne bifilaire.

On définit, le facteur de vitesse X , avec, $v_p = X.c$ où v_p est la vitesse de propagation dans la ligne et c la vitesse de la lumière. Ce facteur dépend de la géométrie et des propriétés intrinsèques du câble. En général ce facteur de vitesse est donné par les fabricants de câbles.

Tableau I.3 - Valeurs de L et C de quelques types de câbles [3].

Référence câble	C (pF /m)	L (μH /m)	Facteur de vitesse (X)	Impédance caractéristique en Ohm (Ω)
RG58CU Câble Coaxial	100	0.250	0.659	50
AWG22 Paire torsadée blindée quadruple	106.5	0.517	0.690	54
AWG24 Paire torsadée blindée	47.28	0.587	0.710	120
AWG26 Paire torsadée	49.61	0.659	0.640	105
AWG20 Une seule paire dans un faisceau	31.71	0.976	0.740	150

Le tableau (**Tableau I.3**) référence quelques valeurs de capacité et d'inductance linéiques de certains types de câble. La capacité pour une ligne ouverte ou l'inductance pour une ligne en court-circuit est directement proportionnelle à la longueur du câble. Donc en mesurant la capacité ou l'inductance globale d'un câble connu, il est possible de déterminer la distance du circuit ouvert ou court-circuit. Il y a plusieurs méthodes permettant de mesurer la capacité ou l'inductance globale d'un câble, nous pouvons utiliser des diviseurs de tensions,

des ponts diviseurs (Wheatstone, Sauty, Wien, Nernst»), des oscillateurs ou tout autre dispositif permettant la mesure d'une impédance. Ces dispositifs utilisent le câble pour émuler une inductance ou une capacité produisant ainsi soit une tension, un courant ou une variation de fréquence qui dépend de la capacité linéique C ou de l'inductance linéique L .

Cette technique de diagnostic est performante dans la mesure où elle est utilisée pour diagnostiquer l'état d'un câble simple mais n'est pas adaptée pour l'analyse de réseaux filaires complexes, ainsi que si le câble est en fonctionnement.

1.4.2. Méthodes par réflectométrie

A l'heure actuelle, la méthode la plus utilisée pour le diagnostic des défauts dans les réseaux électriques est la méthode de la réflectométrie. Elle est basée sur le principe du radar qui consiste à envoyer un signal dans le système ou dans le milieu à diagnostiquer et à étudier le signal réfléchi. Cette méthode est utilisée non seulement pour le diagnostic de défaut dans les réseaux de câbles électriques mais aussi dans d'autres domaines tels que la géo-technologie, le génie civil et le test des matériaux [1].

Le tableau ci-dessous (**Tableau I.4**) résume les problèmes les plus couramment rencontrés dans les faisceaux de câbles électriques en aéronautique, les indicateurs primaires qui permettent de les diagnostiquer et les méthodes permettant de les détecter. Les problèmes évoqués peuvent être détectés par diverses méthodes qui se différencient par leur principe de mesure, les types de signaux utilisés et la nature du défaut que l'on désire diagnostiquer. En effet, toutes les méthodes ne peuvent pas être utilisées pour détecter tous les défauts dans tous les types de câbles.

Tableau I.4 - Types de détérioration, indicateurs primaires et méthodes de détection [3].

Type de détérioration	Indicateur primaire	Méthode de détection
Echauffement du câble	Zone d'usure	Inspection visuelle
Mauvais contact	Variation d'impédance, échauffement local	Réfectométrie, test point à point
Court-circuit non franc	Interférence électromagnétique, arc électrique	Inspection visuelle, Réfectométrie
Court-circuit franc	Système de disjoncteur	Réfectométrie
Isolant défectueux	Fissure, zone abimée	Inspection visuelle, réfectométrie
Conducteur exposé	Perte de fonctionnalité, incendie	Inspection visuelle, réfectométrie
Corrosion	Perte de signal ou de données	Réfectométrie
Humidité	Perte de signal ou de données	Inspection visuelle, réfectométrie

1.4.2.1. Principe de la méthode de réfectométrie

La méthode est basée sur l'injection d'un signal d'onde dans le câble et l'analyse du signal réfléchi, via le coefficient de réflexion, qui est le rapport entre le signal réfléchi et le signal injecté. Ce coefficient permet de remonter à certaines caractéristiques du réseau [11].



Figure I.12 - Principe de la réflectométrie [10].

L'instrument de mesure électronique utilisé pour caractériser et localiser des défauts dans les câbles électriques est appelé réflectomètre. Le réflectomètre est constitué d'un câble, d'un générateur d'impulsion dont le rôle est d'émettre l'échelon dans le câble, d'un coupleur et d'un oscilloscope dont le rôle est d'enregistrer les variations d'amplitude du signal incident en fonction du temps (Figure I.13).

Le générateur de signal émet par exemple une impulsion de type échelon qui se propage dans le câble. Arrivé à un obstacle dans le câble, le front d'onde est réfléchi et repart vers l'oscilloscope qui enregistre les variations d'amplitude du signal en fonction du temps, dans le plan d'injection.

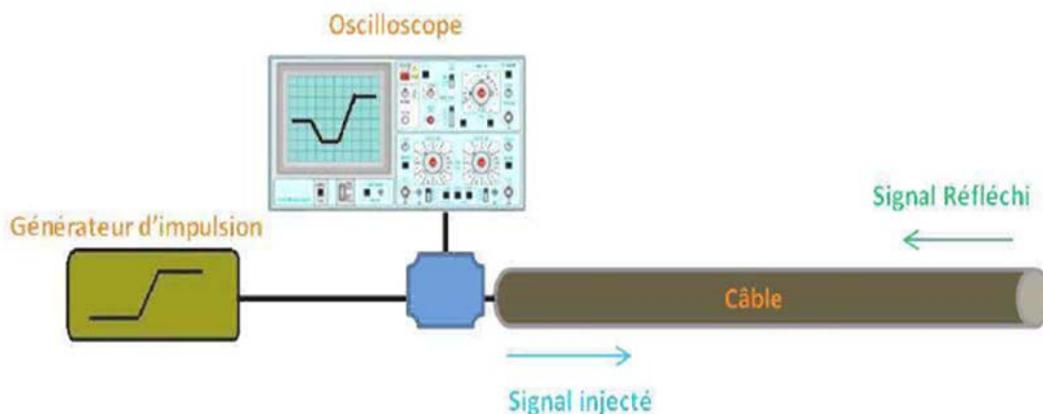


Figure I.13 - Schéma présentant le principe de la réflectométrie [2].

Tableau I.5 - Différentes applications de la réflectométrie [2].

Milieu	Impulsion	Obstacle	Information recueillie
Câble	Electrique	Extrémité, défaut, connecteur	-Présence d'un défaut sur le câble -Défaut d'un connecteur entre 2 tronçons
Fibre optique	Lumineuse	Extrémité, défaut, connecteur	-Présence d'un défaut sur une fibre -Défaut d'un connecteur entre 2 tronçons
Sous-sol	Mécanique, électromagnétique	Zones plus compactes (roches) ou moins compacte (liquides, gaz)	Présence d'objets enfouis, d'eau, de pétrole, de gaz, etc.
Corps humain	Ultrasonore (échographie)	Zones plus compactes (os) ou moins compacte (liquides, sang)	-Imagerie médicale -Détection d'hémorragies, de tumeurs
Air	Electromagnétique (radar)	Cible : personnes, avion, bateaux, voiture, nuage, etc.	-Détection de cibles -Mesure de distance, de vitesse
Mer, océan	Ultrasonore (sonar)	Fonds-marins, banc de poissons, sous-marin	-Imagerie du relief du fond marin -Détection de la présence de poisson

Remarque : les méthodes de réflectométrie sont variées et diffèrent par la forme du signal d'onde injecté dans le câble à tester mais aussi par le domaine d'analyse. Néanmoins, quel que soit le signal de test choisi et le domaine d'analyse la réflectométrie repose toujours sur le même principe.

1.4.2.2. Réflectométrie dans le domaine temporel

La méthode de base de la réflectométrie dans le domaine temporel ou TDR (Time Domain Reflectometry) consiste à envoyer une impulsion ou un échelon de tension dans la ligne puis à analyser le signal réfléchi dans le plan d'injection. La figure I.14 en schématise le principe. On obtient alors un réflectogramme (Figure I.15). Ce dernier se présente sous la forme d'une succession de pics, correspondant aux réflexions de l'onde incidente sur les différentes discontinuités de la ligne (défaut, jonction, connecteur non adapté, etc.).

La nature et la position du défaut (on suppose que la vitesse de propagation est connue) sont déterminées respectivement par l'amplitude et le retard de propagation des pics détectés. Plusieurs types de signaux d'injection peuvent être utilisés : une fonction porte, un échelon de Heaviside ou une impulsion de Gauss. Cette dernière, dont l'expression est donnée par l'équation (1.2), est souvent préférée car elle introduit moins de distorsions sur le signal retour. Le temps de montée du signal d'injection doit être le plus court possible pour assurer une bonne précision de localisation, tout en minimisant l'atténuation due aux pertes fréquentielles.

$$s(t) = A \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{a}\right)^2} \quad (1.2)$$

où A est l'amplitude du signal de Gauss et a le facteur d'étalement.

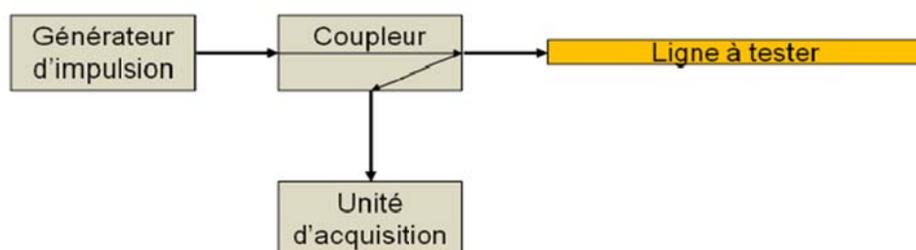


Figure I.14 - Principe de la méthode TDR.

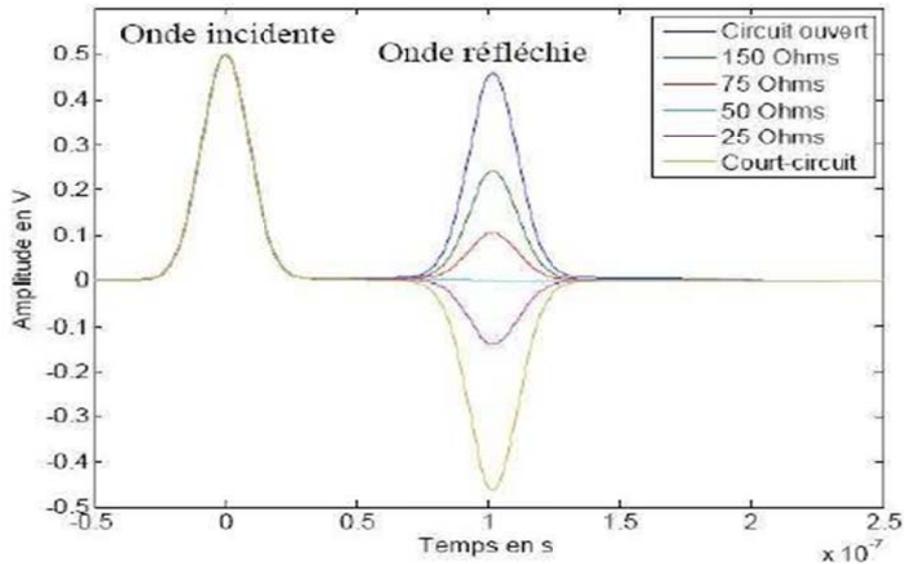


Figure I.15 - Réflectogrammes pour différentes valeurs d'impédances de charges sur un câble coaxial d'impédance caractéristique 50Ω [10].

1.4.2.3. Réflectométrie dans le domaine fréquentiel

Le principe de la méthode est d'injecter dans la ligne un signal modulé en fréquence (la fréquence de ce signal varie linéairement au cours du temps) et d'analyser l'onde stationnaire créée par superposition de cette onde et de celles qui seront renvoyées par les hétérogénéités. La figure ci-dessous (**Figure I.16**) représente un signal fréquentiel « chirp » dont la variation en fréquence est linéaire. Ce signal est défini comme suit:

$$X(t) = \sin(\theta(t) + \phi) \quad (1.3)$$

$$\theta(t) = \int_0^t \pi f(u) du \quad (1.4)$$

$$f(t) = F_{min} + \frac{F_{max} - F_{min}}{t_{max}} \cdot t \quad 0 \leq t \leq t_{max} \quad (1.5)$$

Lors de l'injection de ce signal dans le câble sous test, il est nécessaire d'utiliser un système électronique qui va permettre de mesurer et d'analyser le signal présent dans le plan d'incidence afin d'en déterminer les caractéristiques

(longueur, impédance de charge, capacité, inductance, résistance et localisation d'un défaut franc).

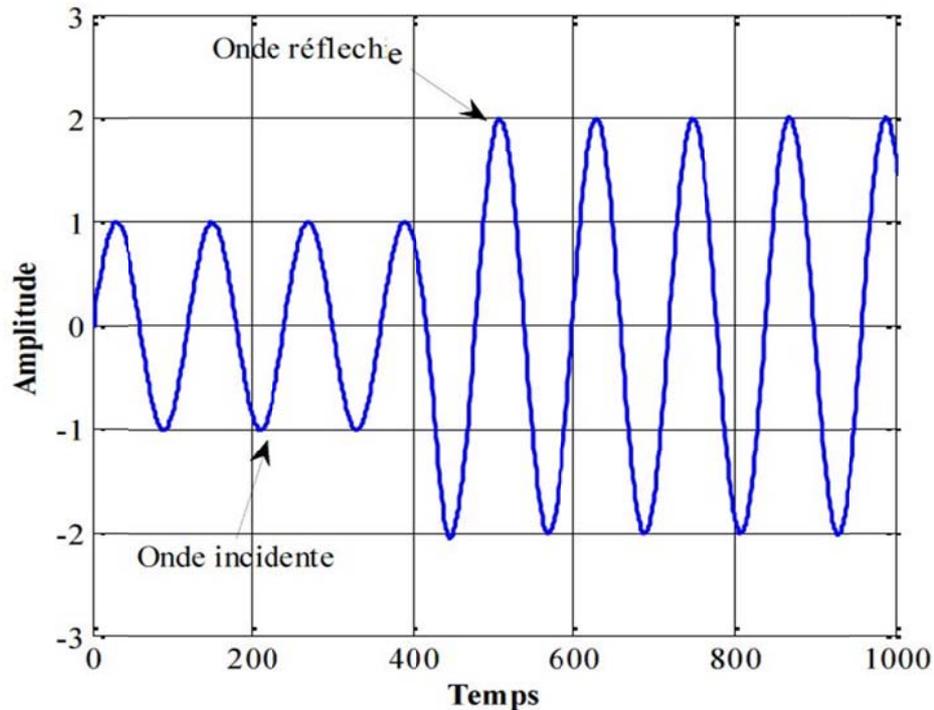


Figure I.16 - Réponse fréquentielle à une excitation sinusoïdale.

Dans la littérature de [2], on retrouve des descriptions sur les méthodes dérivées de la réflectométrie dans les domaines temporel et fréquentiel mais aussi une méthode qui utilise les deux simultanément.

1.4.2.4. Performances de la réflectométrie

La réflectométrie est avantageuse du fait de sa simplicité d'utilisation puisqu'on a juste besoin du câble à tester et d'un point d'injection.

D'autre part, les performances d'une méthode de diagnostic sont évaluées par sa capacité à détecter et à localiser un défaut avec précision. Et les méthodes de réflectométrie ont prouvé leur efficacité à détecter les défauts dans les

réseaux filaires, même de topologies complexes. Elles ont donc comme avantage la précision.

Néanmoins les méthodes de réflectométrie voient leur précision de localisation du défaut se dégrader avec l'augmentation de la longueur des câbles. Ceci est dû aux phénomènes d'atténuation et de dispersion subis par le signal de test au cours de sa propagation. Si le défaut est proche d'un connecteur ou d'une jonction, il est difficile de le localiser avec précision.

Un autre point critique peut influencer la précision de localisation d'un défaut et ainsi mettre en péril la qualité du diagnostic. Il s'agit de la vitesse de propagation qui permet de localiser le défaut sur le câble. En effet, la vitesse de propagation dépend de l'état du câble. Par exemple, le vieillissement du câble peut faire varier la vitesse de propagation.

Plus loin, si le système de diagnostic n'est pas adapté à son entrée avec le réseau, une partie du signal de test est directement renvoyée vers le point d'injection sans se propager dans le réseau. Ceci se traduit par un pic au début du réflectogramme qui peut masquer la présence d'un autre défaut proche du point d'injection (zone aveugle). Il faut dans ce cas affiner les méthodes par un choix spécifique des signaux de test ou distribuer les mesures en différents points du réseau (diagnostic distribué).

Lorsque la ligne est constituée de plusieurs discontinuités d'impédances consécutives. Dans ce cas-là, il apparaît sur le réflectogramme de nombreux pics dus aux réflexions, la présence de cette multitude de pics rend l'interprétation plus difficile.

Tableau I.6 - Avantages et inconvénients des méthodes de diagnostic filaire [3].

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Inspection visuelle	Elle peut détecter le défaut sans mesures	Limitée à la recherche des défauts visibles de l'extérieur, elle ne peut pas être utilisée quand les câbles sont regroupés, blindés ou dans des zones difficiles d'accès
Méthode par rayon X	Elle permet de connaître l'état de la face extérieure du câble (isolant) et des conducteurs	Couteuse, applicable que pour les câbles faciles d'accès
Spectroscopie d'impédance	Permet de connaître l'état du câble en analysant les caractéristiques de son isolant	Le câble doit être isolé de tout système, ne peut pas être utilisable pour une application embarquée
Méthode capacitive inductive	Simple, peu encombrante et peu chère	Diagnostic des câbles simples, elle n'est pas adaptée aux réseaux complexes et si le câble est en fonctionnement
Réfectométrie dans le domaine temporel	Elle est précise pour de nombreux types de défauts	Difficile à appliquer sur les réseaux à plusieurs défauts

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évoqué les types de défauts qui nous ont montré qu'ils diffèrent de leur sévérité et de leur origine, ensuite nous avons mis l'accent sur le vieillissement des câbles et enfin les méthodes de détection et de localisation de ces défauts. Nous avons présenté dans le tableau ci-dessus les avantages et les inconvénients de ces méthodes, les circonstances dans lesquelles telle ou telle méthode doit être privilégiée sur une autre. Nous pouvons nous apercevoir que la réflectométrie constitue le meilleur compromis en termes d'efficacité, de coût et de facilité de mise en œuvre.

D'après le tableau I.6, on remarque qu'il est important de connaître le type de défaut et la méthode qui lui correspond afin que le diagnostic soit le plus efficace possible.

Avant de présenter et afin de bien comprendre la nouvelle méthode de diagnostic filaire proposée dans ce manuscrit, il est nécessaire de comprendre certaines bases théoriques importantes, comme la théorie des lignes de transmission.

Dans le chapitre suivant, nous décrirons les paramètres d'une ligne de transmission et le modèle adopté pour la propagation filaire.